損傷構造物の信頼性解析

京都大学工学部 正員 白石 成人　　京都大学工学部 正員 古田 均
京都大学工学部 学生員 ○小山 徳成

1 まえがき

土木構造物は公共構造物として重要な用途に使用されるだけに，カタストロフィックな破壊が生じた場合の社会的・経済的影響は計り知れない。通常このような破壊は，腐食，摩耗，破損等の何らかの損傷が誘因となって起こることが多い。よって構造物の供用中の安全性確保には，損傷時の構造信頼性をどのように評価するかが重要である。ところが，構造物の損傷状態を定量的に明確な形で評価することは，構造物の使用環境の複雑さ，あるいは予算の不足等の経済的な問題から容易ではない。

本研究では，損傷度評価に関する技術者の経験や工学的判断をできるだけ利用することを目的とし，理論的な基盤をもち，より現実的な安全性評価法を導くことを試みる。すなわち，損傷状態をファジィ集合で評価し，その結果を従来の信頼性理論と組合せ，ファジィ確率を用いて安全性推定を行う。

2 損傷構造物の信頼性解析

一般に，構造物の損傷程度を視察や簡単な点検から正確に判定することは困難である。そこで本研究では，損傷程度をある幅をもったあいまいなものとして，ファジィ集合で規定する。いま，損傷は構造物の抵抗強度Rのみに影響を与えるとすると安全余裕は式(1)で表わされる。ただしSは荷重効果である。ここでRとSが正規分布に従い，互いに独立であるとすると，安全性指標$\tilde{\beta}$は式(2)で与えられる。ただし$\tilde{\delta}$は，損傷による抵抗強度の低下を表わす係数で，ファジィ量である。また，μ_R, μ_S, σ_R, σ_SはそれぞれRとSの平均値および標準偏差である。

$$\tilde{Z} = \tilde{\delta} R - S \qquad (1) \qquad\qquad \tilde{\beta} = \frac{\tilde{\delta}\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\tilde{\delta}^2\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \qquad (2)$$

このとき式(2)はファジィ量を含むため，その計算には特別の演算法が必要である。そこで本研究では，Dubois－Pradeの提案した拡張原理に基づくL－R関数による四則演算[1]および，以下に示す今回新たに提案した平方根の近似演算法を用いる。

$$\sqrt{(m, \alpha, \beta)} \cong (\sqrt{m}, \alpha/2\sqrt{m}, \beta/2\sqrt{m}) \qquad (3)$$

式(3)において，mは可能性の最も高い値を表わし，ここでは中央値と呼んでいる。また，α, βはそれぞれ左関数および右関数の広がりの大きさを表わすパラメータである。式(3)を用いると，破壊確率は，$\tilde{P}_f = \Phi(-\tilde{\beta})$ とファジィ確率で表わされる。

3 構造系全体の破壊確率の算定

本研究では，Ang等により提案されたPNET法[2]を用いて，構造系全体の破壊確率P_fを計算する。PNET法では，2つの崩壊モード間の相関係数がある基準値ρ_0より大きいか小さ

Naruhito SHIRAISHI　Hitoshi FURUTA　Norishige KOYAMA

いかによって，それらの崩壊モードが完全従属あるいは完全独立と分類し，近似的にP_fを求める。ところが前述したように，損傷程度を低減係数$\tilde{D}$を用いて評価すると，相関係数もファジィ量となり，通常の方法では計算できない。そこで本研究では，崩壊モードを分類する方法として，以下の3つの方法を考え検討した。

第1法　各崩壊モードの破壊確率$\tilde{P}_{fi}$の中央値のみに注目する。この方法では，従来のP-NET法と同様の結果を得る。

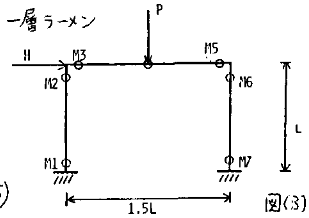
第2法　$\tilde{P}_{fi}$のメンバーシップ関数の幅の小さいものに注目する。相関係数の基準値をファジィ量として$\tilde{\rho}_0$で表し，これと崩壊モードiとjの相関係数$\tilde{\rho}_{ij}$の最小値，中央値，最大値をそれぞれa, b, c, A, B, Cとすると，i) $a \leqq A$かつ$c \geqq C$，ii) $c \leqq A$，iii) $a \leqq A < C$かつ$c < C$のとき$\tilde{\rho}_{ij}=(1,0,0)$として両者は完全従属，それ以外のときは$\tilde{\rho}_{ij}=(0,0,0)$として両者は完全独立とする。

第3法　$\tilde{\rho}_{ij}$のメンバーシップ関数の危険側(右側)のすそ野が大きいものに注目する。すなわち，i) $c < A$，ii) $a > A$かつ$c < C$，iii) $a \leqq A < C$かつ$c < C$，iv) $a = A$かつ$c = C$のとき$\tilde{\rho}_{ij}=(1,0,0)$，それ以外のとき$\tilde{\rho}_{ij}=(0,0,0)$とする。

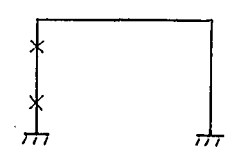
4　数値計算例と考察

図(1)のラーメンに図(2)のような損傷がある場合に対する，上述の3つの方法による破壊確率の計算結果を図(3)に示す。ただし，損傷程度を表わす$\tilde{D}$は，図(4)に示す$\tilde{D}=(0.75, 0.25, 0.25)$を用いる。図(3)に示すように，損傷による影響をファジィ量$\tilde{D}$で規定することにより，構造物の安全性をファジィ確率としてより汎用的な形で評価することができる。第1法と第3法の結果が全く同じになったのは，モデルの単純さからくるものと思われる。第2法と第3法を比べた場合，メンバーシップ関数の幅は第2法の方がかなり小さく，危険側のすそ野の広がりは第3法の方が大きいことがわかる。これより構造物の設計等において破壊確率を求める際に，精度が必要な場合には第2法を，安全性の確保を重視する場合には第3法を用いるべきであろう。

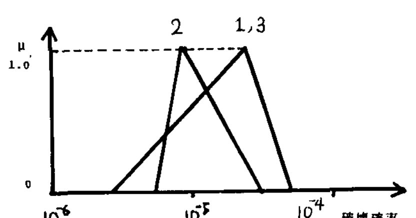
図(1) 一層ラーメン



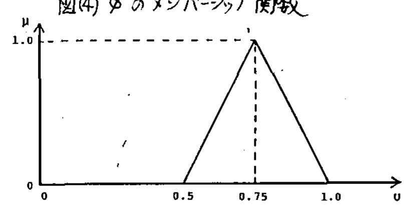
図(2) 損傷パターン



図(3) 破壊確率のメンバーシップ関数



図(4) $\tilde{D}$のメンバーシップ関数



5　あとがき

本研究より，損傷構造物の破壊確率を比較的簡単にファジィ確率の形で求めることができる。また，相関係数の評価方法により，得られる結果に差異が見られるが，これは逆に目的に応じて破壊確率の評価尺度を変えられることを意味し，ファジィ確率による評価がより多くの情報を含む汎用的な方法であることがわかる。

参考文献　D.DUBOIS,H.PRADE ; Fuzzy Re al Algebra : Some Results . Fuzzy Sets and Systems Vol.2 No.4,pp327 ～349　ALFREDO H-S.ANG WINSON H.TANG :PROBABJLITY CONCEPTS IN ENGINEERING PLANNING AND DESIGN,JOHN-WILEY and SONS